

南极半岛海洋气候区的土壤 气候变化响应

陈 杰¹ 龚子同¹ Blume HP²

(¹ 土壤与农业可持续发展国家重点实验室 (中国科学院南京土壤研究所) 南京 210008;

² Institute of Plant Nutrition and Soil Science, University of Kiel, Kiel D-24098 Germany)

摘 要 气候变化导致南极海洋气候区冰川消退、多年积雪融化,为新的土壤形成与分布提供了潜在的母质基础与发展空间;地表和土壤内部水分活动在时间和空间上的加强促进了以自由水为基础的土壤过程和冰缘地貌过程;由气候变化引发的低等植物生境、群落结构变化、初级生产力与生物量的提高、海洋脊椎动物迁徙和栖息地的变迁,影响了本区土壤有机质积累过程以及土壤有机质结构与性状。已有的证据表明,气候变化正对南极海洋气候区土壤发生、发育及演变产生重要影响。

关键词 气候变化;南极;土壤;成土因素

中图分类号 S153

南极特殊的地理位置和独特的自然环境使其成为对全球气候变化最敏感、响应最强烈的地区。研究表明,过去 50 年来的全球变化过程中,南极及其邻近地区的增温幅度大于全球平均增温幅度,其中一些地区气候变暖速率甚至是全球平均水平的 2 ~ 3 倍。南极气候变化的趋势和速率具有时间和空间

上的多样性,而南极海洋气候区是南极气候变暖速度最快的地区之一^[1],位于南极海洋气候区乔治王岛 (King George Island) 的中国南极长城站与东南极大陆的中山站的气温监测记录对比证实了这一结论(图 1)。来自英国南极考察委员会 (BAS :British Antarctic Survey) 的资料表明,从 1947 年开始,南

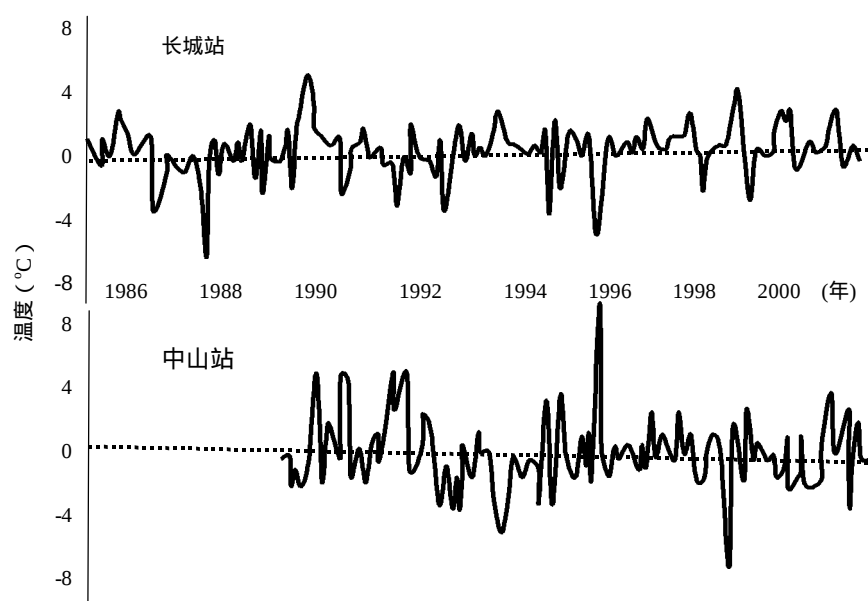


图 1 中国南极长城站与中山站 1985 ~ 2000 年气温变化对比^[1]

Fig. 1 Comparison of the variation of air temperature the Great Wall Station with that at the Zhongshan Station during the period from 1985~2000

极海洋气候区的主要组成部分南极半岛 (Antarctic Peninsula) 地区的气温每 10 年平均升高 0.5°C , 这是迄今为止全球范围内所观测到的最快气候变暖记录。另有学者指出, 南极半岛地区的气温升高趋势

至少在 1900 年就已经开始^[2]。位于南极半岛北端附近海域的南设得兰群岛 (South Shetland Islands) 在 1944~1999 年间气温上升了 1.5°C ^[3, 4] (图 2)。

南极海洋气候区是南极风化成土作用最强、土

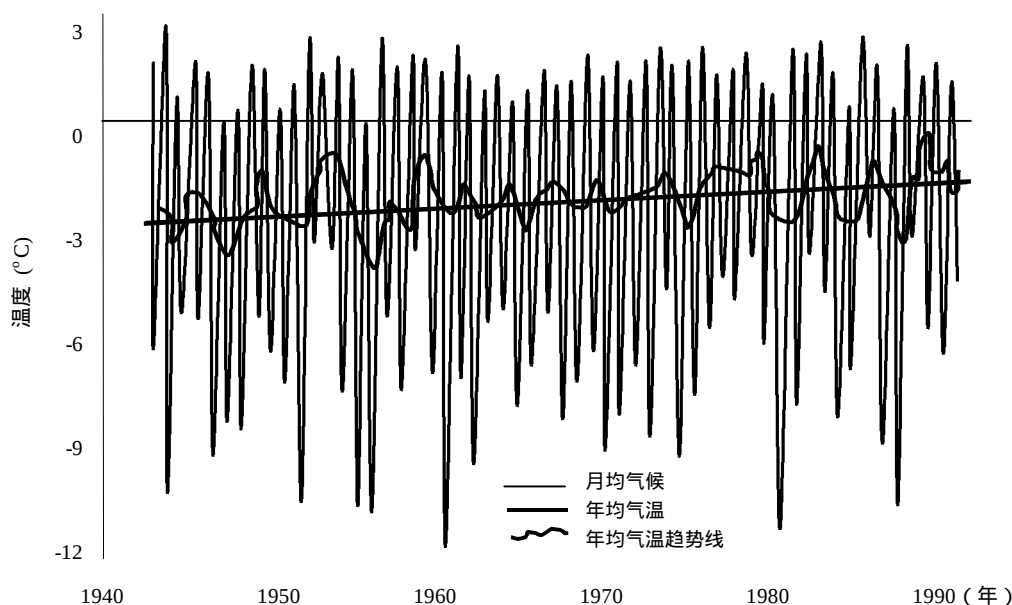


图 2 南极乔治王岛别林斯高晋站 (Bellingshausen Station) 1944~1999 年气温观测记录^[4]

Fig. 2 Records of mean monthly and annual air temperature at Bellingshausen Station, King George Island, the maritime

壤发育程度最高、土壤类型最多、土被空间结构最复杂的地区^[5]。尽管如此, 与地球上绝大多数其他地区相比, 土被结构发育的幼年性和发展演化的强烈不稳定性是本区土壤最突出特点。随着气候变化日趋剧烈, 南极海洋气候区内土壤发生、发育所遭受的影响日益突显, 成土过程、土壤性状、发生类型、分布模式、演变趋势正以一种可以察觉的速度发生变化。土壤作为决定性的非生物要素, 在南极生态系统的形成、演化以及元素生物地球化学循环过程中发挥极为重要的关键作用, 是维持地球上最后一个天然的、但也是最简单和最脆弱的生态系统的重要物质基础。因此, 研究土壤对气候变化的响应, 对揭示整个南极地区陆地生态系统在全球变化背景下的动态演变与反馈机制具有重要意义。

1 土壤发育空间

南极地区大约 2% 的陆地面积区常年或季节性无冰雪覆盖 (ice-free), 主要分布在南极横贯山脉 (Transantarctic mountains) 南极海岸以及南极半岛等海洋气候区。只有在这些无冰区, 地表暴露在各

种风化营力和成土作用之下, 才可能有真正意义上的土壤发生、发育^[5, 6]。因此, 无冰地表是南极地区土壤形成和演化的空间基础。

气候变化导致冰川消退、海面升降是导致南极无冰区面积变化的主要驱动因素。过去几十年内气温不断升高导致南极海洋气候区内大部分冰川经历了明显的消退过程。野外调查数据结合高分辨率卫星影像判读结果显示, 分布于南设得兰群岛乔治王岛海军部湾 (Admiralty Bay) 和波特湾地区 (Potter Cove) 的 21 条不同类型的冰川, 在 1956~1995 年的 40 年间均发生了强度不等的消退作用, 冰川面积缩小幅度 $0.3\% \sim 36\%$ 。其中 7 条最大冰川的面积之和由 1956 年 170.5 km^2 缩小到 1995 年的 159.5 km^2 , 平均消退幅度达 6.45% 。从时间序列上看, 冰川消退的速率有明显加快趋势。1956~1979 年间 7 条冰川面积缩小幅度为 2.87% , 而在 1980~1995 年间缩小幅度达到 3.58% ^[4, 7] (图 3)。与冰川消退一样, 地表其他形式的常年或多年冰雪如冰盖、雪堤 (perennial snowbank) 在气候变暖背景下的消退与消融为土壤发生、发育与演化拓展了空间。

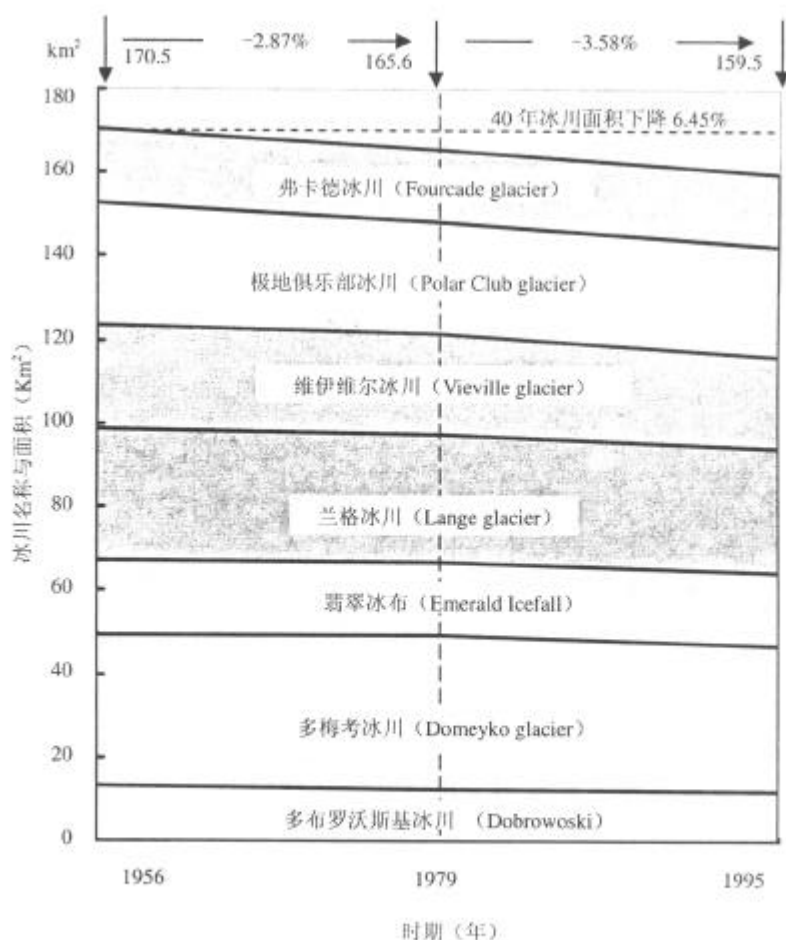


图3 乔治王岛部分冰川 1956 ~ 1995 年期间消退状况与面积动态变化

Fig. 3 Ice front retreat rates of some glaciers on the King George Island, the maritime Antarctica in the period 1956 – 1995

全球气候变化背景下海面升降与地壳均衡抬升形成的各种海蚀阶地和上升海滩同样为土壤发生、发育提供了新的空间。据有关资料，南极大陆早在3500万年前的渐新世初期可能就有冰川形成、发育。末次冰期后，大约距今1万年前后，气候转暖，陆地冰川大量消融，导致海面回升；同时，地壳由于冰体负荷减小而发生补偿抬升(均衡抬升)，形成各种类型不同、海拔各异的上升海滩和海蚀阶地^[8]。

研究表明，南极边缘区全新世地壳均衡抬升速率大约为2.7 mm/a，其中位于南极海洋气候区的南极半岛及附近岛屿地壳均衡抬升的速度大于南极其他地区。在南乔治亚岛(South Georgia Island)分布2道上升海滩、4级海蚀基岩平台，其中海拔2.5 m的上升海滩形成时间不超过距今200年^[9]。而在乔治王岛的测年结果显示，海军部湾海岸海拔2 m、6 m、10 m和14 m等4道上升海滩的形成年代分别是250年、550年、800年和1000年^[8, 10]。在南极

乔治王岛的土壤调查发现，在不同时期的上升海滩上已有不同土壤类型开始发育并演化^[11]。

2 新成母质

作为成土因素之一，母质对南极土壤发生、发育的影响具有特殊的重要性。与地球上风化、成土作用强烈的温带、热带地区相比，南极地区土壤与其成土母质之间的发生学联系更紧密，土壤与母质之间的物理、化学性状具有更大的相似性，以至于南极一些地区早期的土壤分类与制图主要基于母质分异特征^[12]。强烈的异源性和不均质性(heterogenous and asymmetric)是南极地区成土母质最普遍的特点，这一特点在各种冰缘地貌活动非常强烈的南极海洋气候区更为突出。

冰川在南极海洋气候区成土母质搬运与重新堆积过程中发挥非常重要的作用。一般而言，冰川所搬运的物质有两个主要来源：一是冰川自身对底床

与谷壁基岩拔蚀 (ice-plucking) 和消融 (ablation) 作用产生的岩石物理风化碎屑, 主要分布于冰川的下部和底部; 二是其他物源的风化物质, 在重力、风力等其他外力作用下进入冰川, 主要分布于冰川的表层和上部。随着气候变暖, 冰川消退, 冰川搬运物质发生沉积, 各种冰碛物 (moraine depositions) 形成。因此, 气候变化导致的冰川消退不仅拓展了

土壤发育与演变空间, 而且为发育在冰川消退地区的土壤提供了发生学物质基础。在冰川消退过程中, 冰川中不同来源的碎屑物质形成不同的冰碛沉积, 其中冰上碛 (supraglacial till) 碎屑物质绝大部分都经历了相当强烈的前期风化作用 (preweathering processes)^[13], 形成在这类沉积物上的土壤即使在发生、发育的初始阶段就具有较为深厚的土层 (图 4)。

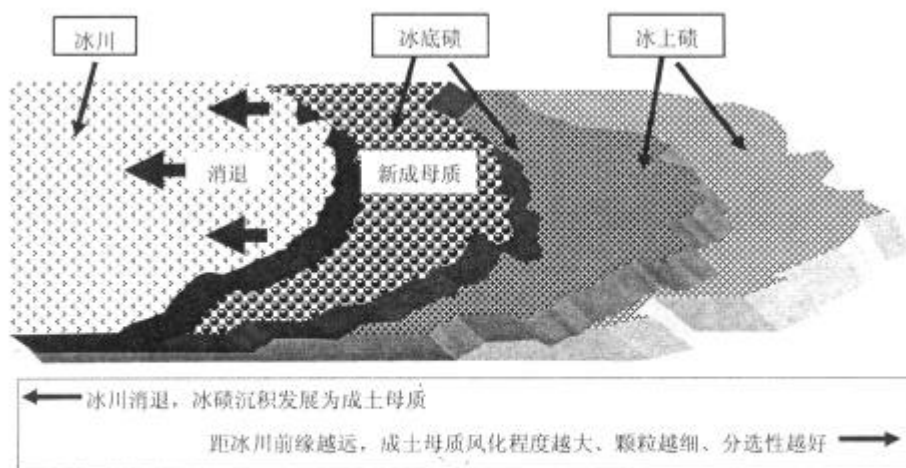


图 4 冰川消退与冰碛沉积母质的形成、类型及分布格局

Fig. 4 Formation, types and re-distribution pattern of moraine depositions in relation to retreat of glacial front

气候变化导致海面升降与地壳均衡抬升是海岸地区成土母质发生重新分配和海相沉积母质产生的根本原因。全新世以来南极海洋气候相对强烈的海岸地貌活动对本区土壤发生、发育产生重要影响。首先, 地壳均衡抬升造成在海岸阶地风化基岩残积物和各种冰碛、沉积物上形成的土壤层遭受侵蚀, 导致土壤发育阻滞甚至全面中断, 成土过程在新近形成的残积或沉积母质上进行。另一方面, 上升海滩为新的土壤类型发生、发育提供了空间和母质基础。南极乔治王岛的土壤调查显示, 以冲积土 (fluvisols) 为主的幼年土壤已经在各级上升海岸上形成、发育。较老海滩的成土母质除海相沉积的砂质物质外, 某些区域的成土母质还包括入海冰川 (Tidewater glacier) 消退形成的冰碛沉积。不同年代上升海滩上发育的土壤其盐分含量及其在剖面中的分布有明显区别, 地表植被状况不同也导致土壤有机质含量存在差异 (表 1)^[11, 14]。

3 冰缘地貌过程与冻—融作用

南极海洋气候区冰缘过程主要包括寒冻风化作用 (frost weathering) 冻融分选作用 (freeze-thaw

表 1 南极海洋气候区乔治王岛不同上升海滩上发育的典型土壤

Table 1 Typical soil types developed in different raised beaches on the King George Island, the maritime Antarctic

上升海岸类型	代表性土壤	主要成土母质
现代上升海滩	冲积土 (Fuvisols)	砂质海积物
	盐积冲积土 (Salic Fluvisols)	
	潜育冲积土 (Gleyic Fuvisols)	
	冲积沙土 (Fluvic Arenosols)	
较老上升海滩	冲积土 (Fuvisols)	砂质海积物 冰碛物
	饱和含盐冲积土 (Eutri-salic Fluvisols)	
	不饱和寒冻冲积土 (Dystri-gelic Fluvisols)	

sorting) 以及雪融作用等。冰缘地貌过程控制着整个南极海洋气候区无冰地表的发育与演化, 对土壤发生、发展具有极其重要的作用。

冰缘过程的强弱与气候因素密切相关, 气候变化通过直接和间接的方式影响冰缘地貌的发生与演化。首先, 气候变暖直接改变土壤与大气热量平衡界面, 并通过影响地表状况 (地表裸露状况、积雪厚度等) 直接影响土壤—大气热交换过程。另外,

气候变暖导致的冰川消退、多年积雪消融使岩石表面与地表自由水含量增加和存在时间延长,为更强的寒冻风化作用提供了赖以发生的温度条件和物质基础。

南极海洋气候区是南极土壤冻融交替过程 (freeze-thaw processes) 最为强烈的地区,深刻影响着本区土壤的发生、发育与演化进程^[15]。冻融过程的实质是土壤和风化壳中不同形态水分之间相

互转化的过程,土壤自由水是这一过程的产物,同时也是土壤冻扰作用 (frost disturbance) 的物质基础。气候变化不仅影响土壤自由水含量,同时直接影响土壤 大气的热交换过程,进而导致土壤冻融交替作用发生的时间 (从冻结转入消融以及从消融转入冻结)、土壤冻结期与消融期持续的时间长度、冻融作用发生的深度与强度,以及土壤水分动态变化规律具发生明显差异 (图 5)^[16]。

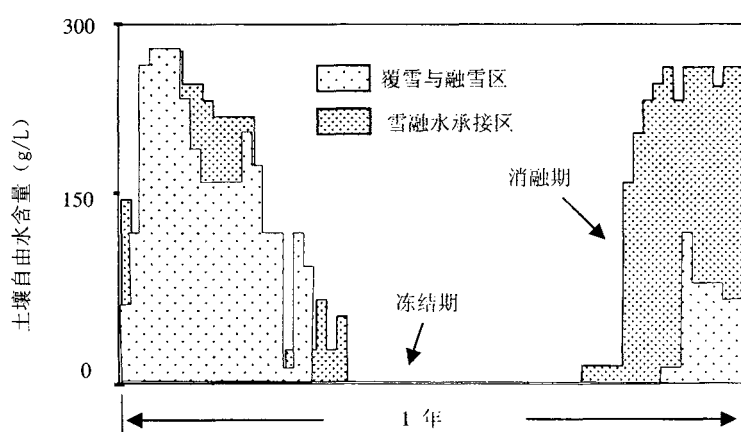


图 5 微区地形部位及地表状况对冻—融作用及土壤自由水动态的影响

Fig. 5 Variations of freeze-thaw cycle and soil moisture dynamics resulting from site difference within a small area

气候变化对土壤下伏的永久冻土层(permafrost)动态也具有重要影响,并由此影响土壤过程与剖面形态。地球上 37 % 的永久冻土分布在南极地区,其中占南极无冰区总面积 4.6 % (约 2500 km²) 的永久冻土分布在南极半岛及其附近岛屿生态—气候带以及东南极海洋生态—气候带^[17]。南极海洋气候区永冻层多呈不连续分布,潜在含水量丰富。夏季消融期永冻层埋深一般在 40 ~ 150 cm 之间^[15, 17, 18]。随着这一地区年均气温的升高,一方面永冻界面 (permafrost table) 总体呈现逐步下移的趋势;另一方面,由于年内气温振幅的收窄,土壤冻结期 (Freezing period) 缩短,而夏季土壤最大解冻深度 (thawing depth) 却相对变小,导致土壤活动层厚度变薄,以自由水分基础的冻胀分选 (frost sorting)、冰间离 (ice segregation)、以及翻浆和泥流现象更加集中于近地表土层。

4 生物活动与有机质积累

相对温暖适宜的气候条件使南极海洋气候区成为南极生物物种最为丰富、生物活动最为强烈的地区,相对强烈的土壤有机质积累作用是南极海洋气

候区在土壤形成过程中明显区别于南极大陆尤其是南极内陆地区的一个突出特点。本区土壤中不仅有较为明显的有机质积累过程,而且某些局部地形景观上有机质的积累与转化深刻地影响着土壤的理化性状和形态特征^[14, 19, 20]。

以地衣和苔藓为主的低等植物群落对气候变化具有高度敏感性,气候变化通过改变南极海洋气候区陆地生态系统低等植被的生境和生理特性而对其生物活动产生影响。南极地区的土壤在一般意义上可粗略地划分为两大类型,植被土壤 (soils with macroscopic plant life) 和无植被土壤 (soils without macroscopic plant life); 后者习惯上被称为无机土壤 (ahumic soils), 意即不含有机质的土壤。在这类土壤中,除个别含无烟煤层 (anthracite coal) 的剖面外,全 C 和全 N 含量只在 0.2 ~ 0.4 g/kg 和 0.02 ~ 0.04 g/kg 之间^[21]。随着气候变暖,常年冰雪消融为低等植物提供了新的生境。南极地区仅有的两种显花植物原本只零星分布于南极半岛最北端及附近岛屿,随着气候逐渐变暖,这两种高等植物的分布范围逐步南扩;同时,原本封冻于常年冰雪中的远程捕获的植物种子 (long-trapped seeds) 随消融作用释

放,造成新的高等植物种类在南极地区出现。随着气温升高,地表植被面积的扩大不可避免导致无植被土壤向植被土壤的演化。地表生物活动的参与和有机质积累过程的开始将逐渐改变无机土壤的发育与演变方向,最终从宏观上改变无机土壤与植被土壤的分布模式和区域内土被的空间结构。同时,原来的植被土壤由于地表植被盖度增大、生物量增加,土壤有机质积累过程进一步加强,导致土壤有机质含量增加。另外,气候变化必然导致低等植物演替和植被群落结构变化,从而对进入土壤的有机凋落物的类型、性状以及在土壤内部的分解与矿化过程产生影响。

海洋脊椎动物在南极海洋气候区土壤有机物积累过程中发挥重要作用。据有关研究估算,仅各种企鹅每年以各种形式携带到南极海洋气候区陆地生态系统中的海洋有机 P 总数量大约在 $(1.5 \sim 2.0) \times 10^4 \text{ t}$ 之间^[22]。被企鹅携带到陆地的海洋性有机物质并不局限于栖息地内循环,其中相当一部分通过地表径流、淋洗、挥发、风力以及企鹅天敌等途径扩散到更加广阔的区域,对地表植被和土壤营养物质含量产生积极影响。

从较大的空间尺度上说,海洋脊椎动物对气候变化的响应正好与植物对气候变暖的适应趋势相反,大量的研究表明气候变暖正造成南极海洋气候区内企鹅和海豹等数量的急剧减少,活动强度与范围快速下降。其主要原因是海冰消融致使这些海洋脊椎动物主要食物南极磷虾(Antarctic krill,)数量的减少,为了获取足够的食物来源,企鹅、海豹不得不向南迁徙。从一个较大时间尺度和较小空间尺度上而言,气候变化对海洋脊椎动物活动的影响则表现出另外一种模式。在南极海洋气候区海岸带分布着大量的企鹅栖息地,随着海面变化和地壳均衡抬升,企鹅原来的栖息地距离海岸越来越远,为了更方便地从海洋中获取食物,企鹅不得不遗弃原来的栖息地,在更加接近海岸的地方筑巢,新的鸟成土开始形成。而原来栖息地上发育的土壤不再接受海洋性有机物质的输入,鸟粪层(guano)遭受地表径流冲刷、下行水流淋洗以及风力吹蚀而迅速变薄乃至剥蚀殆尽。由于遗弃栖息地土壤中残留大量有机质与各种营养元素,以地衣为优势种的低等植被开始着生并迅速繁茂,新的有机质积累过程开始,土壤发生学性状逐渐改变,土壤发育朝一个新的方向进行。

5 结 论

尽管理论上气候变化在一个较大的时间尺度上足以改变特定区域内土壤发生、发育的强度与发展、演化的方向,从而对全球土壤分布格局和土被结构产生关键性的影响。但就南极海洋气候区第四纪以来的气候变化、特别是气温升高的幅度与速率而言,尚不能对本区的土壤形成与演变直接产生根本性影响。事实上,气候变化对南极海洋气候区土壤发生、发育的作用主要是通过影响特定地形部位的地表状况(冰川消退、积雪消融等)土壤母质类型(搬运与重新分配等)生物活动强度(生物类型、数量或盖度及生物量等)等方式间接表现出来。由气候变暖导致的冰川消退和常年积雪消融,一方面为土壤在新出露的地形部位发生、发育提供了母质和空间基础;另一方面,通过自由水供给状况和地表热交换模式的改变促进对土壤形成与演化具有重要影响的冰缘地貌过程。生境的拓展、种群结构的演变、初级生产力与生物量的增加等是南极海洋气候区内低等植物对气候变暖的主要响应机制,并通过影响土壤有机质积累过程、土壤有机质结构与性状从而影响土壤发生、发育与演化进程。气候变化导致的海面升降与地壳均衡抬升不仅影响海岸地貌上土壤形成与发展进程、重塑这一区域土壤景观类型与分布模式,而且通过海洋脊椎动物活动的响应过程对土壤中海洋性来源有机物质的输入数量与分布范围产生重要影响。

参考文献

- 1 陆龙骅,卞林根,程彦杰. 中国南极气象考察与全球变化研究. 地学前缘, 2002, 9 (2): 255 ~ 262
- 2 Jones PD. Antarctic temperatures over the present century: a study of the early expedition record. J. Climate, 1990, 3: 1193 ~ 1203
- 3 Kejna M. Air temperature on King George Island, South Shetland Islands, Antarctica. Polar Res., 1999, 6: 151 ~ 158
- 4 Braunn M, Gossmann H. Glacial changes in areas of Admiralty Bay and Potter Cove, King George Island, Antarctica. In: Beyer L and Boelter M. eds. Geocology of Antarctic Ice-free Coastal Landscapes. Springer-Verlag, Berlin, 2002, 75 ~ 88
- 5 陈杰,龚子同, Blume HP. 南极半岛海洋性气候区的土壤 I. 风化作用. 土壤, 2003, 35 (4): 279 ~ 285
- 6 Claridge GGC, Campbell IB. Some features of Antarctic

- soils and their relation to other desert soils. Trans. 9th Int. Congr. Soil Sci., 1968, 4: 541 ~ 549
- 7 Braun M, Simoes JC, Vogt S, Bremer UF, Blindow N, Pfender M, Saurer H, Aquino FE, Ferron FA. An improved topographic database for King George Island. Compilation, application and outlook. Antarctic Sci., 2001, 13 (1): 41 ~ 63
 - 8 谢又予. 中国南极长城站地区(菲尔德斯半岛)地貌与沉积. 北京: 海洋出版社, 1993, 215 ~ 263
 - 9 Adie JR. Sea level changes in the Scotia Arc and Graham Land. Antarctic Geology, SCAR Proc. 1963, 120 ~ 128
 - 10 Birkenmayer K. Raised marine features and glacial history in the vicinity of Arctowski Station, King George Island (South Shetland Islands, West Antarctica). Bull. Acad. Pol. Sci., 1981, 29: 109 ~ 117
 - 11 Blume HP, Beyer L, Kalk E, Kuhn D. Soils and soilscapes. In: Beyer L and Boelter M. eds. Geoecology of Antarctic Ice-free Coastal Landscapes. Berlin, Springer-Verlag, Ecological Studies, 2002, 154: 91 ~ 113
 - 12 McCraw JD. Soils of Taylor Valley, Victoria Land, Antarctica, with notes on soils from other localities in Victoria Land. N. Z. J. Geol. Geophys., 1967, 10: 498 ~ 539
 - 13 Calkin PE. Geomorphology and glacial geology of the Victoria Valley system, Southern Victoria Land, Antarctica. Ohio State Uni. Inst. Polar Studies, Rep. 1964, 10: 66 ~ 82
 - 14 Chen J, Gong ZT, Blume HP. Soils of Fildes Peninsula, King George Island, the maritime Antarctic: Part I. Formation processes and Pedogenetic particularities. Chinese Journal of Polar Science, 2000, 11 (1): 25 ~ 38
 - 15 陈杰, 龚子同. 南极海洋性气候区土壤水分动态变化研究. 极地研究, 1999, 11(4): 241 ~ 254
 - 16 陈杰, 龚子同, 阮心玲, Blume HP. 南极半岛海洋性气候区的土壤 冻—融作用与水分状况. 土壤, 2004, 36 (1): 5 ~ 11
 - 17 Bockheim JG. Permafrost distribution in the southern circumpolar region and its relation to the environment: a review and recommendations for further research. Permafrost and Periglacial Processes, 1995, 6: 27 ~ 45
 - 18 Bockheim J, Hall KJ. Permafrost, active-layer dynamics and periglacial environments of continental Antarctica. South African Journal of Science, 2002, 98: 82 ~ 90
 - 19 陈杰, 龚子同, Blume HP. 南极半岛海洋性气候区的土壤 有机质积累过程. 土壤, 2003, 35 (5): 364 ~ 369
 - 20 Chen J, Gong ZT, Role of Lichens in weathering and soil-forming processes in Fildes Peninsula, Antarctic. Pedosphere, 1995, 5 (4): 305 ~ 314
 - 21 Campbell IB, Claridge GGC. Antarctic soils, weathering processes and environment. Amsterdam, Elsevier Science Publisher, 1987, 73 ~ 96
 - 22 Myrcha A, Tatur A. Ecological role of the current and abandoned penguin rookeries in the land environment of the maritime Antarctic. Pol. Polar Res., 1991, 12: 3 ~ 24

SOILS IN THE MARITIME ANTARCTIC . RESPONSES TO CLIMATE CHANGE

CHEN Jie¹ GONG Zi-tong¹ Blume HP²

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences) , Nanjing 210008;

2 Institute of Plant Nutrition and Soil Science, University of Kiel, Kiel D-24098 Germany)

Abstract In the maritime Antarctic region, retreat of glaciers and shrink of perennial snow cover induced by climate warming not only provide new spatial room and potential parent materials for pedogenesis, but enhance temporal and spatial availability of free water, which plays an all-important role both in periglacial processes and in the processes within soil profiles, thus influencing soil genesis and evolution to a great degree. Climate warming leads to changes in habitat environments, species numbers, community structures, primary productivities of lower plants and activities of the maritime vertebrates, therefore posing influences on accumulation intensity and composition of organic matter in soils. In short, evidence obtained indicates that climate change is posing significant influences on formation and development of the soils in the maritime Antarctic region.

Key words Climate change, Antarctica, Soil, Soil-forming factors